

PERANCANGAN ALAT PENUKAR KALOR UNTUK PEMBANGKIT SISTEM ORC

M. Zainu Azkiya^{1*}, Eka Maulana²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, 12640, Jakarta, Indonesia

*Penulis koresponden: azkiyazainu@gmail.com

ABSTRAK

Konsumsi energi listrik nasional yang terus meningkat merupakan tantangan bagi warga negara Indonesia untuk dapat menemukan atau memberikan ide gagasan yang dapat dilakukannya penghematan sumber energi listrik. Dengan adanya energi biomassa, banyak variabel-variabel yang dapat dimanfaatkan munculnya sistem penghasil energi listrik salah satunya ialah sistem *Organic Rankine Cycles (ORC)*. Tujuan dari penelitian ini untuk rancangan alat penukar kalor yang terdapat dalam sistem ORC menggunakan refrigerant, memanfaatkan gas buang dari proses pirolisis yang merupakan salah satu proses biomassa dan merencanakan kontruksi alat penukar kalor yang berada dalam siklus ORC dengan jenis Shell and Tube. Alat penukar kalor yang direncanakan berjenis evaporator. Perencanaan ini menghitung perpindahan kalor dan kontruksi alat penukar kalor tipe Shell and Tube. Sistem ORC ini merupakan sebuah kesamaan pada sistem siklus *rankine*, yang membedakannya ialah jika siklus *rankine* menggunakan fluida kerjanya adalah air, ORC menggunakan fluida kerja refrigerant. Refrigerant dipanaskan sehingga menjadi uap yang akan memutar turbin. Ukuran utama yang didapatkan dari hasil perhitungan alat penukar kalor yaitu diameter dalam *Shell* 488,95 mm (19,25 in), dan panjang **3657,6 mm**. Fluida yang mengalir pada *Shell* adalah gas buang, dan fluida yang mengalir pada *Tube* adalah refrigerant jenis R-134a, material 304 Stainless Steel dengan jumlah 73 *Tube*, tebal *Tube* 18 BWG, diameter luar *Tube* **31,75 mm**. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa system ORC dapat ditukar dengan jenis shell dan tube dengan spesifikasi diameter dalam *Shell* 19,25 in , menggunakan jumlah 73 tube, dengan tebal 18 BWG, berbahan 304 Stainless Steel, fluida yang mengalir adalah R 134a.

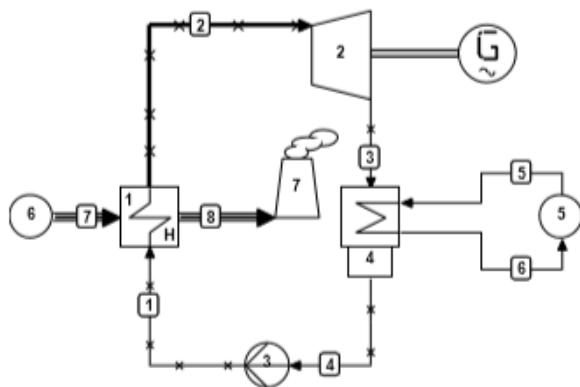
Kata Kunci : Gas Buang, R134a, Shell dan Tube, Suhu, Kalor.

PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik nasional dalam kurun waktu tahun 2016-2018 terus mengalami peningkatan dengan laju pertumbuhan pelanggan rata-rata 5,65% per tahun, dari yang tahun sebelumnya mencapai 68 juta pelanggan, dan di tahun 2018 mencapai 71,9 juta pelanggan (made suprateka, *Executive Price President Corporate Communication and CSR PT PLN (Persero)*, 2018). Untuk mengatasi permasalahan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat, pemerintah melakukan suatu terobosan yaitu dengan dilakukannya kampanye hemat energi. Dengan adanya kampanye hemat energi tersebut, diharapkan dapat menghemat energi listrik sebesar 10% di tiap tahunnya. Selain itu diperlukan juga upaya pemanfaatan sumber energi alternatif yang lebih maksimal. Pemanfaatan sumber energi alternatif yang harus dikembangkan ke depannya ialah dari energi biomassa yang memiliki peluang cukup tinggi. Biomassa bisa dilakukan dengan banyak proses seperti Gastifikasi, Pirolisis, Biodegrader, Pembakaran (*Combustion*), dan Torefaksi. Proses-proses tersebut menghasilkan output seperti bahan bakar minyak dan bahan bakar gas yang dapat digabungkan dalam proses ORC (*Organic Rankine Cycle*) sehingga dapat menghasilkan energi listrik. ORC (*Organic Rankine Cycle*) merupakan modifikasi dari sistem siklus *rankine* dengan menggunakan fluida tertentu sebagai sistem media kerja untuk menghasilkan

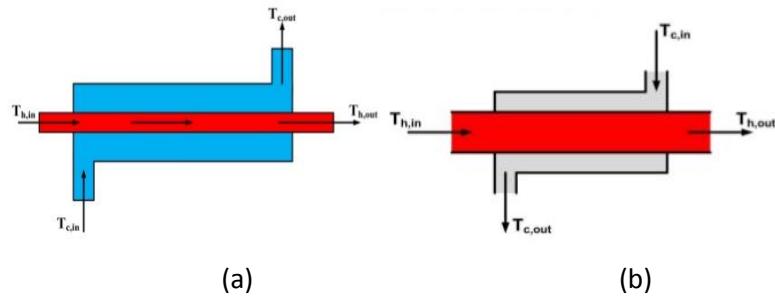
energi listrik. Sistem ini memiliki 4 komponen utama yaitu evaporator, turbin, kondensor dan pompa. Kondensor dan evaporator pada sistem *ORC* merupakan contoh alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pemanas maupun pendingin terhadap fluida di dalam sistem (Jalal 2018). Pembahasan dalam tugas akhir ini ialah memodifikasi alat penukar kalor dengan merancang dan menganalisa alat penukar kalor untuk digunakan sebagai dua fungsional yaitu memanaskan refrigerant untuk menggerakkan turbin pada sistem *ORC* dan mendinginkan uap panas plastik untuk menghasilkan bahan bakar minyak standar (sejenis premium dan solar) dan bahan bakar gas pada proses pirolisis. Pirolisis adalah gasifikasi parsial. Merupakan proses dekomposisi termokimia dari material organik, yang berlangsung tanpa udara atau oksigen. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada $T < 300^{\circ}\text{C}$ dan terjadi secara cepat pada $T > 700^{\circ}\text{C}$ (Slamet and Hidayat 2015).

Organic Rankine Cycle (ORC) adalah modifikasi siklus *rankine*. *ORC* merupakan pembangkit listrik siklus biner yang memiliki prinsip kerja seperti siklus daya uap *rankine*. Pada siklus *ORC* memungkinkan memanfaatkan sumber energi dengan temperatur operasi rendah. Hal yang membedakan siklus *rankine* dan *ORC* adalah fluida kerja serta kondisi operasinya (Firdaus and K.P. 2014). Pada siklus *rankine* fluida kerja yang digunakan adalah air, sedangkan untuk sistem *ORC* fluida yang digunakan adalah fluida organik yang memiliki titik didih yang lebih rendah dibandingkan dengan air. Sistem *ORC* akan menggunakan komponen evaporator sebagai pengganti steam generator atau boiler di siklus *rankine*. Sistem *ORC* memanfaatkan sumber panas dengan temperatur rendah seperti panas buang pada industri, panas matahari, biomassa serta brine dari pembangkit panas bumi.



Gambar 1. Sistem Siklus rankine organik (ORC) (Mohammad Aziz M 2017)

Alat penukar kalor adalah suatu alat yang memungkinkan perpindahan panas dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap lewat panas (super-heated system) dan air biasa sebagai air pendingin (cooling water). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja.



Gambar 2. APK aliran searah (a) APK aliran berlawanan arah (b) (Abdul 2014)

Rumus yang digunakan:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \times Cp_h \times (T_1 - T_2) \quad [1]$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} \quad [2]$$

$$A = \frac{\dot{Q}_h}{U_d \cdot LMTD} \quad [3]$$

$$CMTD = F_t \cdot LMTD \quad [4]$$

$$AMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{2} \quad [5]$$

$$N_t = \frac{A}{a_o \cdot L_{tube}} \quad [6]$$

$$t_m = \frac{P \text{ design} \cdot r}{(9000 \text{ Psi} \cdot 0,8) - (0,6 P \text{ design})} + C \quad [7]$$

$$T_c = \frac{(T_1 + T_2)}{2} \quad [8]$$

$$Baffle = \frac{1}{5} \cdot ID_s \quad [9]$$

$$A_s = \frac{ID_s \cdot C'' \cdot B}{P_t \cdot 144} \quad [10]$$

$$R_{e,s} = D_e \cdot G_s / \mu \quad [11]$$

$$A_t = \frac{N_t \cdot A' t}{n \cdot 144} \quad [12]$$

$$R_{e,t} = ID_t \cdot G_t / \mu \quad [13]$$

$$h_i = \frac{JH \cdot k}{ID_t} \left(\frac{Cp_c \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \phi_t \quad [14]$$

$$\frac{h_{io}}{\theta_t} = h_i \cdot \frac{ID_t}{OD_t} \quad [15]$$

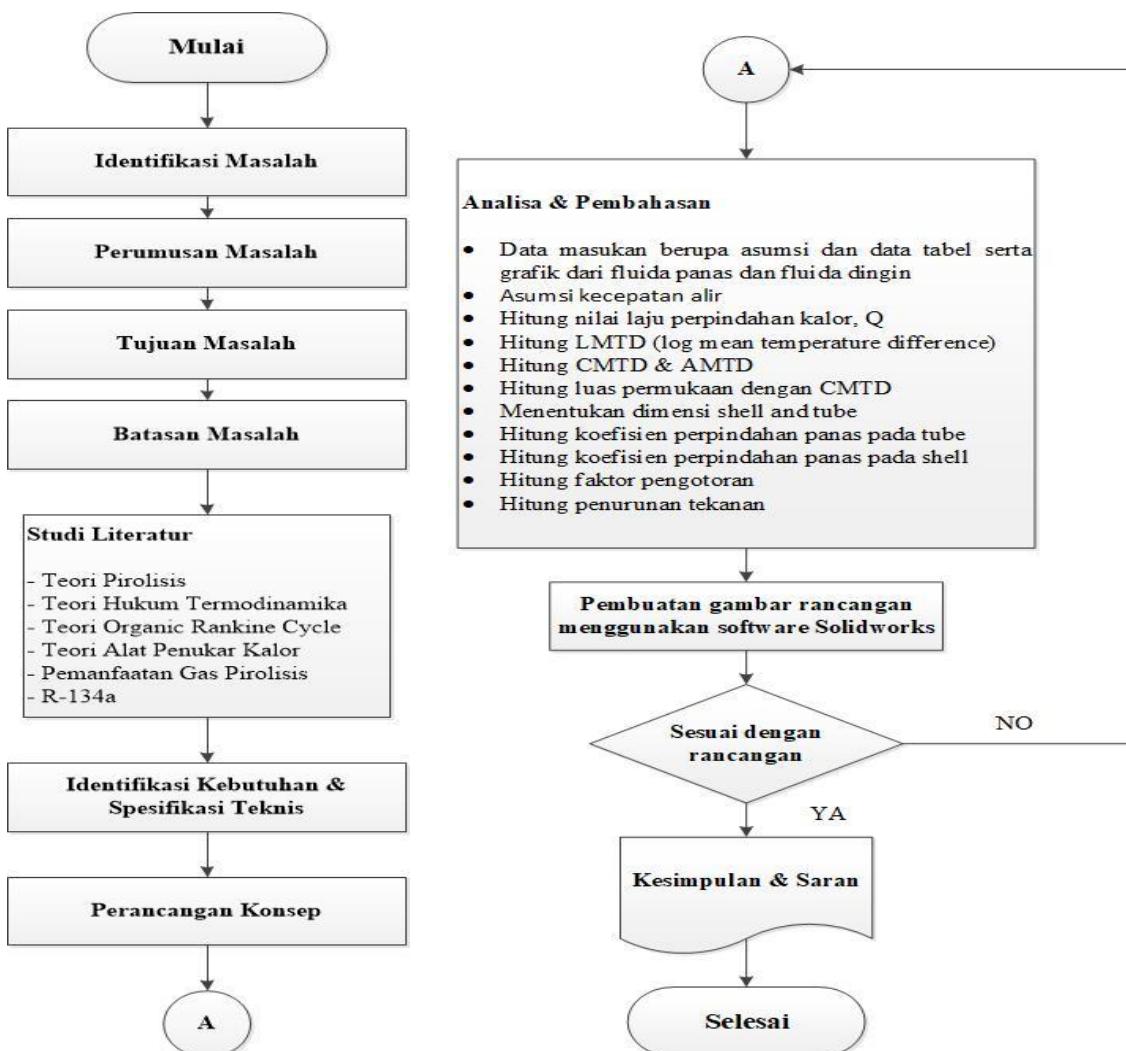
$$U_c = \frac{h_{io} + h_o}{h_{io} + h_o} \quad [16]$$

$$R_{d\ act} = \frac{U_c - U_{d\ act}}{U_c \times U_{d\ act}} \quad [17]$$

$$\Delta P_s = \frac{f_s \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_g \cdot SG \cdot \theta s} \quad [18]$$

$$\Delta P_t = \frac{f_t \cdot G_t^2 \cdot D_s \cdot L \cdot n}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D \cdot SG \cdot \theta t} \quad [19]$$

METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3. Flowchart

Gambar-gambar berikut adalah beberapa alat penukar kalor yang telah dikembangkan dari instansi lain.

- Alat Penukar Kalor Departemen Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara, Medan.



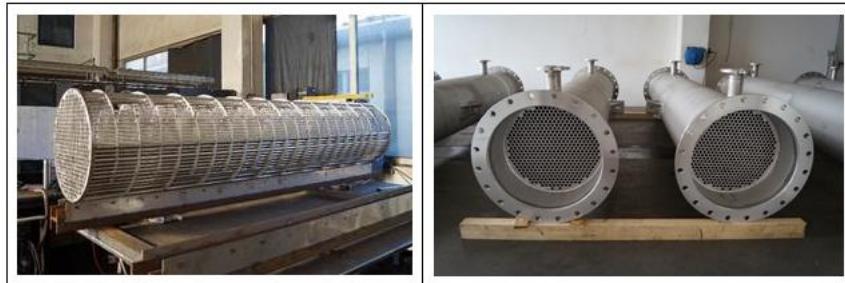
Gambar 4. Alat Penukar Kalor Sejenis 1

- Alat Penukar Kalor Teknik Mesin, Universitas Pancasila



Gambar 5. Alat Penukar Kalor Sejenis 2

- Alat Penukar Kalor PT. Maxtec Teknologi Indonesia



Gambar 5. Alat Penukar Kalor Sejenis 3

HASIL DAN PEMBAHASAN

- Perancangan Dasar Alat Penukar Kalor yang diinginkan

Data media fluida panas (Gas buang pemanasan pirolisis / flue gas)

$$T_1 = 300^\circ\text{C} = 300 + 273 = 573 \text{ K}$$

$$\rho_h = 1210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_{ph} = 3,043 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$\dot{m}_h = 7 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Data media fluida dingin (R - 134a)

$$t_1 = 15^\circ\text{C} = 15 + 273 = 288 \text{ K}$$

$$t_2 = 40^\circ\text{C} = 40 + 273 = 313 \text{ K}$$

$$P_{outc} = 1,6 \text{ MPa} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 232,1 \text{ Psi}$$

$$\rho_c = 1293,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_{pc} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$\dot{m}_c = 15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Data Alat Penukar Kalor

Tipe aliran parallel - berlawanan arah (*Counter flow*)

Shell: Gas buang (flue gas)

Tube: R-134a

Material Tube: *Stainless Steel*

- Perhitungan Laju Perpindahan Kalor

$$\dot{Q}_h = 226,24 \text{ °C}$$

[2.1]

- LMTD (Log Mean Temperature Difference)

$$LMTD = 244,27 \text{ K}$$

[2.2]

- Luas Permukaan Transfer Panas (A)

$$A = 19,64 \text{ m}^2$$

[2.3]

Karena $A > 200 \text{ ft}^2$ atau $18,5 \text{ m}^2$, maka jenis *Shell and Tube* alat penukar kalor yang memenuhi syarat.

- e. LMTD dan A terkoreksi
 Berdasarkan R/s, didapat harga $F_t = 0,95$ untuk 1 pass *Shell* dan 2 more pass *Tube*.
- f. CMTD (Currented Mean Temperature Difference) / LMTD terkoreksi
 $CMTD = 223,04 \text{ K}$ [2.4]
- g. AMTD (Arithmatic Mean Temperature Difference)
 $AMTD = 49,38 \text{ K}$ [2.5]
- h. Menghitung Luas Permukaan (A) dengan LMTD terkoreksi
 $A = 20,67 \text{ m}^2$
- i. Menentukan jumlah *Tube* (N_t)
 $L_{tube} = 12 \text{ ft} = 144 \text{ in} = 3657,6 \text{ mm} = 3,7 \text{ m}$
 $N_t = 68,6 \text{ Tube}$ [2.6]
- j. Tebal *Tube* minimum (tm) :
 $t_m = 0,037 \text{ in}$ [2.7]
- k. Menentukan Tc average dan tc average
 $T_c = 536,12 \text{ }^\circ\text{K}$, $t_c = 300,5 \text{ }^\circ\text{K}$ [2.8]
- l. Data Fluida Panas (Gas buang / Flue Gas)
 $ID_s = 19,25 \text{ in} = 1,6 \text{ ft} = 488,95 \text{ mm}$
 $Baffle = 97,79 \text{ mm}$ [2.9]
 $A_s = 66,4 \text{ mm}^2$ [2.10]
 $R_{e,s} = 82010,25$ [2.11]
 $JH = 180$
- m. Data Fluida Dingin (R-134a)
 $A_t = 170,1 \text{ mm}^2$ [2.12]
 $R_{e,t} = 293100$ [2.13]
 $JH = 510$
- n. Menentukan Koefisien Perpindahan Kalor Lapisan Dalam *Tube*
 $h_i = 32,5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [2.14]
- o. Menentukan Koefisien Perpindahan Kalor Lapisan Luar *Tube*
 $\frac{h_{i0}}{\phi_t} = 30 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [2.15]
- p. Koefisien Perpindahan Kalor Pada Sheel
 $h_i = h_0 = h_{i0} = 8517,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- q. Clean Overall Coefficient, U_c
 $U_c = 6,62 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [2.16]
 $R_{d,act} = 0,0036$ [2.17]
- r. Penurunan tekanan pada *Shell*
 $\Delta P_s = 0,01 \text{ Psi}$ [2.18]

Karena $\Delta P_s < 10 \text{ Psi}$, maka spesifikasi memenuhi syarat

- s. Penurunan tekanan pada *Tube*

$$\Delta P_t = 0,001 \text{ Psi}$$

[2.19]

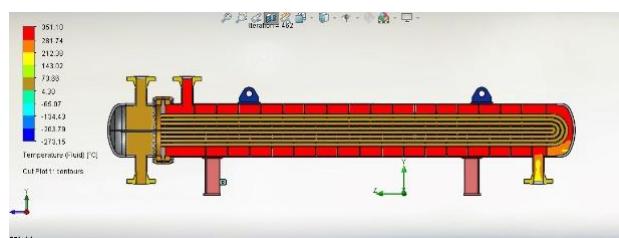
Karena $\Delta P_t < 10 \text{ Psi}$, maka spesifikasi memenuhi syarat

Design Alat Penukar Kalor Sesuai Perhitungan

- t. Design Alat Penukar Kalor Sesuai Perhitungan



Gambar 2. Perancangan Sistem ORC



Gambar 2. Perancangan Sistem ORC

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan pada alat penukar kalor yang direncanakan, maka dapat disimpulkan yaitu data umum yang diperoleh adalah kalor yang diserap oleh R134a sebesar 1571,25 kJ/s, faktor pengotoran 0,0036, koefisien overall transfer panas sebesar 264,64 W/m².K, dan koefisien overall bersih 6,62 .10³ W/(m².K). Lalu didapatkan perhitungan Shell yaitu diameter dalam Shell 19,25 inch =1,6 ft. = 488,95 mm, panjang Shell 12 ft = 144 inch = 3657,6 mm, fluida yang mengalir adalah gas buang / flue gas, temperatur masuk yaitu 573 K, temperatur keluar yaitu 499,24 K, dan pressure Drop Shell sebesar 0,01 Psi. Dan dalam perhitungan Tube yaitu didapatkan diameter luar Tube 31,75 mm, diameter dalam Tube 1,15 in = 29,31 mm, panjang Tube 12 ft = 144 in = 3657,6 mm, jumlah Tube 73 Tubes, tebal Tube 18 BWG, material menggunakan 304 Stainless Steel, fluida yang mengalir R-134a, tekanan perencanaan 1,6 MPa = 1,6.10⁶ Pa=232,1 Psi, temperatur masuk 288 K, temperatur keluar 313 K, dan pressure drop Tube 0,001 Psi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul, Ahmad, "Alat Penukar Kalor (HEAT EXCHANGER)." Medan: Advance Learning Program, 2014.
- Bizzy, Irwin, and Rachmat Setiadi, "Studi Perhitungan Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Dengan Program Heat Transfer Research Inc. (Htri)." Jurnal Rekayasa Mesin 13 (1), 2013, 67–76.
- Firdaus, Alif Nur, and Ary Bachtiar K.P., "Studi Variasi Laju Pendinginan Cooling Tower Terhadap Sistem ORC (Organic Rankine Cycle) Dengan Fluida Kerja R-123." Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri 1, 2014, 1–7.
- Jalal, Said, "Analisa Penukar Kalor Shell Dan Tube Dengan Memanfaatkan Gas Buang Mesin Diesel Aliran Di Dalam Pipa." MECHANICAL ENGINEERING, MANUFACTURES, MATERIALS AND ENERGY 1 (1), 2018, 28–36.
- Mohammad Aziz M., "Perancangan Siklus Rankine Organik Untuk Pemanfaatan Gas Buang Pada PLTU Di Indonesia." Jurnal Rekayasa Hijau 1 (2), 2017, 176–83.
- Slamet, Sugeng, and Taufiq Hidayat, "Studi Eksperimen Pemilihan Biomassa Untuk Memproduksi Gas Asap Cair (Liquid Smoke Gases) Sebagai Bahan Pengawet." Simetris : Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer 6 (1), 2015, 189.

